

# 運動物体の脳内表現とその機能的意義に関する心理物理学的研究

|        |   |
|--------|---|
| 著者     | 日? 聡太   |
| 号      | 21  |
| 学位授与機関 | Tohoku University   |
| 学位授与番号 | 文博第342号   |
| URL    | <a href="http://hdl.handle.net/10097/59372">http://hdl.handle.net/10097/59372</a> |

# ひだかそうた 日高聡太

|         |  |
|---------|--|
| 学位の種類   | 博士(文学)   |
| 学位記番号   | 文博第 342 号  |
| 学位授与年月日 | 平成22年 3 月25日   |
| 学位授与の要件 | 学位規則第 4 条第 1 項該当   |
| 研究科・専攻  | 東北大学大学院文学研究科(博士課程後期 3 年の課程)<br>人間科学専攻  |
| 学位論文題目  | 運動物体の脳内表現とその機能的意義に関する心理物理学的研究  |
| 論文審査委員  | (主査)<br>教授 行 場 次 朗      教授 仁 平 義 明<br>教授 大 淵 憲 一<br>教授 阿 部 恒 之<br>教授 辻 本 昌 弘<br>教授 小 泉 政 利 |

## 論文内容の要旨

### 目 次

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 論文要旨                           | iv |
| 第 1 章 脳内のミッドレベルの処理過程と運動物体表象    | 1  |
| 1.1 ミッドレベルの知覚処理過程              | 1  |
| 1.2 運動知覚と運動表象                  | 4  |
| 1.2.1 運動知覚と仮現運動                |    |
| 1.2.2 運動表象                     |    |
| 1.3 運動物体表象                     | 8  |
| 1.3.1 現象学的証拠                   |    |
| 1.3.2 心理物理学証拠                  |    |
| 1.3.3 脳機能的証拠                   |    |
| 1.4 本論文の目的                     | 19 |
| 第 2 章 仮現運動軌道上で生じる輝度検出の抑制(研究 1) | 21 |
| 2.1 目的                         | 21 |

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 2.2 方法                            | 21 |
| 2.3 結果                            | 25 |
| 2.3.1 輝度極性：実験Ⅰ                    |    |
| 2.3.2 方位：実験Ⅱ                      |    |
| 2.3.3 形：実験Ⅲ                       |    |
| 2.4 考察                            | 28 |
| 第3章 仮現運動物体表象が保持する奥行き情報（研究2）       | 31 |
| 3.1 運動知覚と奥行き知覚                    | 31 |
| 3.2 対応問題解決場面：実験Ⅳ                  | 32 |
| 3.2.1 目的                          |    |
| 3.2.2 方法                          |    |
| 3.2.3 結果                          |    |
| 3.2.4 考察                          |    |
| 3.3 運動の滑らかさ処理場面                   | 40 |
| 3.3.1 目的                          |    |
| 3.3.2 方法の概要                       |    |
| 3.3.3 輝度で定義された奥行き：実験Ⅴ             |    |
| 3.3.4 両眼視差で定義された奥行き：実験Ⅵ           |    |
| 3.3.5 考察                          |    |
| 3.4 運動物体の消失位置定位場面                 | 54 |
| 3.4.1 目的                          |    |
| 3.4.2 方法の概要                       |    |
| 3.4.3 輝度で定義された奥行き：実験Ⅶ             |    |
| 3.4.4 低空間周波数成分の影響：実験Ⅷ             |    |
| 3.4.5 考察                          |    |
| 3.5 総合考察                          | 64 |
| 第4章 仮現運動軌道上で生じる時空間一貫性のある運動知覚（研究3） | 65 |
| 4.1 目的                            | 65 |
| 4.2 方法の概要                         | 66 |
| 4.3 仮現運動軌道上で生じる運動方向反転に対する気づきの抑制   | 66 |
| 4.3.1 先行系列の効果：実験Ⅸ                 |    |
| 4.3.2 色が異なる場面：実験Ⅹ                 |    |
| 4.3.3 運動軌道が変化する場面：実験Ⅺ             |    |
| 4.3.4 先行系列数の効果：実験Ⅻ                |    |
| 4.3.5 視覚的注意の効果：実験ⅫⅢ               |    |
| 4.4 考察                            | 80 |
| 第5章 運動物体の脳内表現とその機能的意義             | 84 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 5.1 運動物体の脳内表現 .....         | 84  |
| 5.2 運動物体の脳内表現がもつ機能的意義 ..... | 86  |
| 5.3 運動物体の脳内表現モデル .....      | 90  |
| 5.4 今後の展望と応用可能性 .....       | 94  |
| 5.4.1 多感覚情報による運動物体の脳内表現     |     |
| 5.4.2 運動物体の脳内表現の可視化         |     |
| 5.4.3 生態学的妥当性のある情報提示技術への応用  |     |
| 5.4.4 高次脳機能障害者の支援可能性        |     |
| 5.5 まとめ .....               | 102 |
| 謝辞.....                     | 103 |
| 引用文献.....                   | 104 |

これまで数々の錯視現象で報告されているように、我々の意識にのぼる知覚は、物理的入力と完全に一致しているわけではない。むしろ、我々にとって都合の良い形で、脳内で内的に変換されていると考える方が妥当である。本論文の主要な目的は、脳内の知覚処理過程で形成される運動物体表象に基づく知覚現象を、心理物理学的な手法によって明らかにすることである。そして、得られた知見から、運動物体の脳内表現およびその機能的側面について考察し、ヒトが外界からの物理的入力を安定した知覚へと内的に変換する知覚情報処理過程の理解を深めることである。

まず、第1章「脳内のミッドレベルの処理過程と運動物体表象」では、外界からの入力が我々の知覚内容へと変換される知覚処理段階とプロセスについて論じた。特に、Marr (1982) が提唱した計算理論的観点の重要性について説明した。これは、知覚システムが行う内的な変換プロセスを数学的な観点から捉え、その計算がなされる目標は何か、なぜそれが適切なものか、そしてその実行可能な方略の論理は何かという、脳内で行われる情報変換の機能的な意義を考える視点である。そして、この観点に基づき、入力（物理的入力）と出力（知覚内容）で用いられる表現（representation）、およびその間を媒介する変換アルゴリズム（algorithm）を検討することが、中間的・媒介的な知覚処理プロセスであるミッドレベルの処理過程を理解する上で重要であると考えた。

次に、ミッドレベルの処理過程を最も良く反映する現象の1つとして、仮現運動現象を取り上げた。仮現運動とは、時空間的に離れた2つ以上の物体（誘導刺激）を、適切な時間間隔で交互に提示すると、物体間に運動が知覚される現象である。その際、運動軌道上にはいかなる物理的入力も存在しない。それにもかかわらず、誘導刺激間の時間－空間間隔が最適であれば、連続的な運動（実際運動）と区別がつかないほど滑らかな運動が知覚される。このことから、我々の知覚システムは、脳内で内的に運動物体表象を運動軌道上に形成することで運動軌道上の物理的入力の欠損を補完し、誘導刺激間で生じる運動知覚を媒介していると考えられる。つまり、運動物体表象の形成過程によって、時空間的にばらばらの物理的入力が1つのまとまった運動知覚へと内的に変換される。このことから、運動物体表象の形成過程は、ミッドレベルの知覚処理をダイレクトに反映すると考えた。

そこで、まず、運動物体表象を取り扱った先行研究の概観を行った（日高・行場, 2008参照）。そして、これまで現象学的・心理物理学的・脳科学的な観点から、運動物体表象形成過程に関して、多角的に検討がなされていることが分かった。しかし、計算理論的観点からこれらの知見を捉え直した場合、運動物体の脳内表現に関しては、誘導刺激と類似した刺激特徴を保持することが示唆されているものの、一

貫した手続きのもと、実際に脳内で、どのような物体表象として表現されているかに関する直接的な検討はほとんどなされていないことが問題点としてクローズアップされた。また、機能的側面に関しては、誘導刺激間の運動知覚を媒介するというある特定の側面だけに焦点があてられていたことが分かった。そこで、本論文では、ある単一の物体が同一性を維持したまま、時空間一貫性を持って運動する知覚を成立させることを運動物体の脳内表現に関する計算理論として考えた。そして、運動物体表象が脳内でどのように表現されているのか、運動物体表象形成過程はどのような機能的意義を持つのかを詳細に明らかにすることを目的とし、仮現運動軌道上に形成される運動物体表象によって生じる知覚現象について心理物理学的検討を行った。

第2章「仮現運動軌道上で生じる輝度検出の抑制」では、比較的低次の知覚処理段階において、仮現運動物体表象が他の物理的な入力と知覚的に相互作用するかを検討した（研究1）。実験では、輝度で定義されたターゲット刺激を仮現運動軌道上に提示し、ターゲット刺激に対する輝度検出閾値を測定した。その結果、誘導刺激とターゲット刺激の輝度極性（背景に対して明るい・暗い）が一致する場面では、ターゲット刺激の検出閾値が上昇する（感度が鈍くなる）ことが示された。このことから、仮現運動軌道上に提示される輝度で定義された刺激に対して、知覚的な抑制が生じることが示された。さらに、誘導刺激とターゲット刺激との間で輝度極性や方位、形が一致しない場面では、知覚的な抑制効果が弱まることが明らかとなった。したがって、仮現運動物体表象による知覚的な抑制効果は、輝度極性や方位、形状の一致性といった刺激属性を反映することが示唆された（Hidaka, Nagai, Bennett, Sekuler, & Gyoba, 2009）。以上の知見から、初期の知覚処理段階において、運動物体表象は誘導刺激と同じ物体特徴を保持して内的に表現されることが明らかとなった。さらに、運動物体表象は、運動する物体と類似した特徴を持つ他の物理的な入力に対する気づきを知覚的に抑制することで、一貫性のある安定した運動知覚を実現するという機能的側面を備えていると結論づけた。

運動情報と同様、奥行き情報もまた脳内で2次元的な網膜像から2.5次元と呼ばれるミッドレベルの処理段階を経て3次元情報へと復元される。そこで、第3章「仮現運動物体表象が保持する奥行き情報」では、運動と奥行きという2つの情報が復元される3次元的な物体が仮現運動する場面において、運動物体表象がどのような奥行き情報を保持するのかを検討した（研究2）。まず、物体そのものの情報よりも時空間情報が優先的に処理される比較的 low 級の運動情報処理場面において、仮現運動物体表象が保持する奥行き情報を検討した。実験では、縦あるいは横というように、仮現運動の運動方向が多義的に知覚される場面において、運動軌道上に瞬間提示されるプローブ（探針）刺激が、3次元的な仮現物体の運動方向知覚に及ぼす影響を調べた。奥行き手がかりとして知覚的な手がかりである陰影を用いた。誘導刺激として凸図形、プローブ刺激として凸、凹および平らの図形を用いた。参加者の課題は、知覚された運動方向が縦であったか横であったかを報告することであった。結果から、運動軌道上にどのプローブ刺激が提示されても、運動方向知覚は変化しないことが示された。したがって、時空間的な情報が優先して処理される仮現運動場面では、運動物体表象は奥行き情報を保持しない、2次元的な物体として表現されることが明らかとなった（Hidaka, Kawachi, & Gyoba, 2006）。

しかし、我々は普段奥行きを持った物体が運動する場面を知覚している。そのため、運動の質など比較的高次の運動情報処理場面においては、仮現運動物体表象は奥行き情報を保持すると考えられた。そこで、知覚された動きの滑らかさが処理される場面において、仮現運動物体表象が運動軌道上の中央で保持する奥行き情報を検討した。ここでは、奥行き手がかりとして、知覚的な手がかりである陰影と

もに物理的な手がかりである両眼視差を用いた。実験では、仮現運動物体の運動方向が常に縦方向に知覚される場面において、2つの仮現運動刺激を左右に提示した。誘導刺激として凸図形あるいは凹図形を用いた。そして、各運動軌道上に、プローブ刺激として凸、凹および平らの図形のいずれかを提示した。参加者には、左右どちらの仮現運動刺激で滑らかな動きが知覚されるかを報告させた。結果から、誘導刺激が凸図形の場合、平らなプローブ刺激を運動軌道上に提示したときに、誘導刺激と逆の奥行き情報を持つ凹図形を提示した時よりも、より滑らかな運動が知覚されることが示された。一方、仮現運動する物体と同じ奥行き情報を持つ凸図形をプローブ刺激として提示した条件では、動きの滑らかさ知覚は促進されなかった。さらに、誘導刺激が凹図形の場合、上記のようなプローブ刺激の効果が消失することが明らかとなった。これらの結果は、陰影と両眼視差の両方の奥行き手がかり間で一致していた。以上の知見から、知覚された動きの滑らかさ処理という比較的高次の運動情報処理場面においては、運動物体表象は特に凸に関して、2次元と3次元との間（2.5次元）の不完全な奥行き情報を保持することが明らかとなった（Hidaka, Kawachi, & Gyoba, 2008）。

さらに、運動軌道上全体にわたって仮現運動物体表象が保持する奥行き情報を検討した。ここでは、動きの滑らかさ知覚の間接的な指標である運動刺激の消失位置に関する運動方向側への定位位置ずれ量を指標として用いた。奥行き手がかりとして陰影を用いた。実験では、水平方向に3点間の仮現運動が知覚される場面を提示した。第1・第3刺激として凸図形あるいは凹図形を用いた。一方、第2刺激として、凸、凹および平らの図形のいずれかを提示した。参加者の課題は、水平方向の仮現運動を観察し、マウスを用いて第3刺激が消失した位置を定位することであった。そして、第3刺激が物理的に消失した位置と定位された位置との間の位置ずれ量を算出した。結果から、第1・第3刺激が凸図形の場合、第2刺激として凹図形を提示した条件に比べ、平らな図形を提示した条件で、運動方向側への定位位置ずれ量が多くなることが示された。一方、仮現運動する物体と同じ奥行きを持つ凸図形を第2刺激として提示した条件では、定位位置ずれ量の増大は見られなかった。また、第1・第3刺激が凹図形の場合、奥行き情報の異なる第2刺激間で定位位置ずれ量に差は見られなかった。以上の知見から、運動の滑らかさ処理についてより間接的な手法を用いた場合でも、運動物体表象は特に凸に関して、2次元と3次元との間（2.5次元）の不完全な奥行き情報を保持することを確認した。次に、不完全な奥行き情報を持つ運動物体表象が、仮現運動知覚で優先的に利用される低空間周波数成分優位の物体として表現される可能性について検討した。まず、低空間周波数透過フィルタによって凸図形を不鮮明化したところ、ある程度奥行き感の損なわれた物体として知覚されることが分かった。そこで、第1・第3刺激が凸図形の場面において、第2刺激として、凸図形、凹図形に加え、不鮮明化された4種類の凸のぼけ画像を提示した。その結果、誘導刺激と反対の奥行き情報を持つ凹図形に比べ、ある特定のぼけ画像を第2刺激として提示した条件で、定位位置ずれ量が増大することが分かった。このことから、運動物体表象が保持する凸に関する2次元と3次元との間（2.5次元）の中間的な奥行き情報は、低空間周波数成分優位の物体表現によって実現されることが明らかとなった（Hidaka, Kawachi, & Gyoba, 2009）。

第3章で得られた知見から、3次元的な物体が仮現運動する場面では、運動物体表象は物理的入力と一致した精緻な物体としてではなく、運動処理段階（低次・高次）に応じて奥行き情報が適切に縮減された物体として表現されることが明らかとなった。このことから、運動物体表象には、運動知覚と3次元物体認知という2つの情報復元過程において生じる高い知覚情報処理負荷を低減させ、滑らかさを持った最適な運動知覚を成立させるという生態学的妥当性を持った機能性が備わっていると考えられた。

第4章「仮現運動軌道上で生じる時空間一貫性のある運動知覚」では、奥行き情報など物体そのものが持つ情報だけではなく、時空間情報においても運動物体表象形成過程において内的な情報変換が行わ

れ、最適な運動知覚が形成される可能性を検討した（研究3）。実験では、5点間の仮現運動系列において、第4・第5刺激の運動方向が先行する系列と一致する、あるいは逆転する場面を提示した。参加者の課題は、第4・第5刺激間に知覚される運動方向を報告することであった。結果から、第4・第5刺激の時空間的な順序が先行する系列と逆行する場面では、逆行しない場面と同様、先行系列と同一方向の運動知覚が生じることが分かった。さらに、この運動方向反転の見落とし現象は、第4刺激の垂直方向がランダムに変化し運動軌道の形が最後まで分からない場合でも生じた。また、先行系列が1刺激のとき（3点間運動）でも運動方向反転の見落としが生じ、先行系列が2刺激（4点間運動）以上の条件で、現象の生起確率が最大となることが分かった。以上の結果から、仮現運動軌道上では、運動方向の逆転という時空間をまたがった不規則な変化が生じた場合でも、時空間一貫性のある運動知覚が生じることが示された。まず、先行系列の刺激数が増えるほど運動方向反転を含む運動系列に一貫性のある運動知覚が生じることから、運動物体表象形成における予測的な外挿メカニズムが運動方向反転の見落とし現象に関与すると考えられた。さらに、運動軌道の形が最後まで分からない場面や、先行する入力1つだけの場合でも、運動方向反転の見落としが十分に生じることから、遡及的な内挿メカニズムもまた時空間一貫性のある運動知覚の成立に寄与していると考えた。したがって、運動物体表象形成過程には、予測的・遡及的な2つのメカニズムによって誘導刺激間の運動知覚を媒介することで、局所的には一貫性のない物理入力が大域的にまとまった表現へと再体制化され、一貫性のある滑らかな運動知覚を生じさせるという機能があると結論づけた。

第5章「運動物体の脳内表現とその機能的意義」では、仮現運動軌道上に形成される運動物体表象について本論文で示された知見をもとに、運動物体の脳内表現およびその機能的意義について考察した。まず研究1では、仮現運動を生じさせる誘導刺激とターゲット刺激との間で輝度極性や方位、形といった刺激属性が一致するほど、仮現運動軌道上で生じる知覚的な抑制効果が強まることが示された。このことから、明るさ・方位・形といった比較的低次の刺激属性は、物理的入力に従う形でそのまま運動物体の物体情報として内的に保持されたと考えられた。一方、2次元的な網膜像から内的に復元される3次元の奥行き情報に関しては、誘導刺激が持つ物理的な入力とは異なった情報が物体表象に保持されることが示された。研究2では、時空間情報という比較的低次の運動情報が優先的に処理される場面において、3次元的な仮現運動物体の物体表象は2次元の奥行き情報のみを保持していることが示された。一方、動きの滑らかさという比較的高次の運動情報処理が行われる場面では、3次元物体の運動物体表象は不完全な、特に凸に関する2次元と3次元との間（2.5次元）の中間的な情報を保持することが明らかとなった。さらに、この中間的な奥行き情報は、仮現運動知覚で優先的に利用される低空間周波数成分を利用した物体表現によって実現されることが明らかとなった。以上のことから、運動物体は、高次の物体属性である奥行き情報に関して、必要に応じて知覚的に3次元へと復元可能な形で、内的に情報縮減された物体として脳内で表現されると結論づけた。

先に述べたように、研究1では、誘導刺激と同じ刺激属性を持つ刺激が運動軌道上にターゲット刺激として提示された場合には、異なる刺激属性を持つ刺激が提示された時に比べ、知覚されにくくなることを示した。このことは、運動する物体と類似した特徴を持つ他の物理的入力が運動軌道上に存在した場合、それが運動する物体とは別の物体として知覚意識にのほらないよう内的に抑制されることを意味する。したがって、運動物体の脳内表現には、膨大な外界入力が時々刻々と変化する中で、単一の物体が一貫して動いているという安定した運動知覚を形成する機能があると考えられた。さらに、この安定した運動知覚を実現する機能は、ある特定の時空間位置に提示された物理的入力に対してだけではな

く、ある程度時空間的な幅を持って働くと考えられた。研究3では、仮現運動軌道上で時空間的な不連続（運動方向反転）が生じた場合にも、知覚的には時空間的に一貫した運動知覚が生じることが示された。このことは、物体表象が運動軌道上に内的に補完されることによって、時空間的な不連続性に対して見落としが生じ、一貫した運動知覚が成立することを示している。このことから、運動物体が脳内で表現される過程には、予測的な外挿メカニズムと遡及的な内挿メカニズムの両者によって、時空間的な不連続に対する気づきの抑制および物理的入力のリテラチゼーションが行われ、常に時空間一貫性のある運動知覚を形成するという機能的特性が備わっていると結論づけた。さらに、研究2では、運動情報と3次元情報という2つの情報に関して内的な復元が行われる3次元物体の仮現運動場面では、運動物体表象は粗い不完全な奥行き情報を保持することが示された。また、運動物体表象と類似した奥行き情報を持つ物体が運動軌道上に提示された場合には、より滑らかな動きが知覚されることが明らかとなった。したがって、運動物体の脳内表現には、物体が持つ情報を内的に圧縮することで物体認知処理にかかる情報処理負荷を軽減し、生態学的に有用性の高い動きの情報を優先的に処理することで、最適かつ滑らかな運動知覚を成立させるという機能的特性を持つと結論づけた。

次に、先行研究で得られた知見と本論文の知見を総合し、運動物体の脳内表現を支える神経処理基盤について考察を行った。外界から網膜に入力された視覚情報は、初期視覚野（V1）と呼ばれる後頭葉の脳皮質領域に投射される。その後、主に動きや位置に関する処理を司る背側経路と、主として形や色の処理を司る腹側経路に分かれる。まず研究1では、明るさ・方位・形などの刺激属性を反映した形で、仮現運動軌道上で知覚的な抑制効果が生じることが示された。先行研究では、仮現運動軌道の観察時には、背側経路に位置するhMT+（V5）と呼ばれる運動処理領域が活動することや、運動軌道上に受容野を持つV1の活動が生じること、このV1における活動がhMT+からのフィードバック投射によって生じることなどが報告されている。したがって、背側経路に位置する運動処理領域とV1からV4に至る初期視覚野との間の神経経路の活動が、運動物体表象の形成に関与すると考えられた。さらに、これまで形状の一致・不一致といった処理が側頭葉の腹側部など高次の物体認知領域で行われることや、誘導刺激間で輝度が異なる仮現運動事態では、背側経路にあたる外側後頭側頭皮質（lateral occipitotemporal cortex）とともに、腹側経路にあたる前側頭葉（anterior temporal lobe）が活動することが報告されている。このことから、運動処理を司る背側経路だけではなく、腹側経路に位置する物体認知領域と比較的初期の視覚野との間にも、情報の伝達が行われていると考えられた。さらに、研究2では、低次（時空間情報）あるいは高次（動きの質）といった運動処理段階に応じて、運動物体表象が保持する奥行き情報に変容することが示された。また、不完全な奥行き情報を持つ物体表象によって、より滑らかな動きの知覚が生じることとも明らかとなった。以上のことは、運動処理領域と物体認知に対応する領域との間に直接的かつ双方向的な神経活動の相互作用があることを示唆する。これを実現する脳部位として、腹側経路と背側経路との間で情報の統合あるいは相互作用が行われるSTP（superior temporal polysensory area）や、仮現運動軌道の観察時に活動するhMT+と腹側経路に位置する外側後頭複合体（lateral occipital complex; LOC）とが一部重複した脳領域が考えられた。以上のことから、運動物体の脳内表現は、ある特定の脳部位によって機能局在的に実現されるよりも、初期視覚野、運動処理領域および物体認知領域の全てを結ぶ、神経回路全体の働きとして行われていると結論づけた。

最後に、運動物体の脳内表現に関する研究の今後の展望と、そこから得られる知見の応用可能性について考察した。まず、本論文では視覚情報のみを扱ったが、いうまでもなく、我々の知覚世界では、対象（犬）を視覚（姿）・聴覚（鳴き声）・触覚（触り心地）など様々な感覚モダリティ入力の相互作用により知覚している。したがって、運動物体の脳内表現もまた、多感覚情報の統合あるいは相互作用によって行



われると考えられた。例えば、これまで視覚的な運動物体表象が、視覚情報だけではなく聴覚情報を保持した物体として表現されていることが示されている (Hidaka, Teramoto, Gyoba, & Suzuki, 2009)。また、視覚情報の信頼性が低下したときにこそ、聴覚刺激によって静止した視覚刺激に動きの知覚が生じることも報告されている (Hidaka, Manaka, Teramoto, Sugita, Miyauchi, Gyoba, Suzuki, & Iwaya, 2009)。このことから、運動物体表象は、異なる感覚モダリティ間で物体が保持する情報だけではなく、運動・静止といったイベントに関する情報の受け渡しを媒介するという機能性を持つ可能性が考えられる。このように、ある単一の感覚モダリティ内における処理と多感覚情報の相互作用・統合過程との間では、運動物体の脳内表現およびその機能性が異なる可能性が考えられるため、今後明らかにする必要がある。

また、本論文の研究およびその他の先行研究では、運動物体の脳内表現を検討する際、別の物理的入力を提示し、それと運動物体表象との相互作用から運動物体表象の知覚的側面を推定するという手法が用いられてきた。上記の方法では、運動物体表象が本来持つ特徴とは異なった特徴が抽出されてしまっている可能性が考えられるため、運動物体表象をそのままの形で可視化することが不可能である。運動物体の脳内表現をより厳密に明らかにするためには、今後、新たな手法を用いて、運動物体表象を直接的かつ非侵襲的に抽出・可視化することが必要不可欠であると考えられる。近年、心理物理的な手法としては、分類画像法と呼ばれる手法によって、内的な表象形成に利用される情報を直接的かつ精緻に明らかにできることが報告されている。さらに、multi-voxel pattern analysis と呼ばれる脳科学的な手法によって、fMRI など で記録された脳活動パターンをもとに、参加者が見ていた画像を復元可能であることが報告されている。今後、これらの新たな手法を用いることで運動物体表象の直接的な抽出・可視化が可能となり、運動物体の脳内表現やそれを実現するアルゴリズムなどがより詳細に明らかとなる可能性がある。

研究2では、低空間周波数成分優位の物体表現によって、運動物体が内的に表象されることが示唆された。低空間周波数成分は大域的な粗い情報であるため、精緻な処理を必要とする形の情報をそのまま扱うよりも情報処理負荷が相対的に少なくなる。また、ある画像に対して低空間周波数透過フィルタを施すという簡単な情報処理によって、ヒトにとって効率的に情報処理が可能な内的なイメージと一致した画像を作成することが可能になる。さらに、研究2で示されたように、運動物体の脳内表現と一致した低空間周波数成分優位の画像は、入力情報として提示することで、知覚的に滑らかな動きを導くことが可能である。以上のことから、本論文で得られた知見は、人の知覚情報処理に適した、新たな情報提示技術の開発に貢献すると考えられた。また、研究3では、運動物体表象の補完によって、時空間的な不連続を含む複数の物理的入力が大域的にはまとまりのある、時空間一貫性をもった運動知覚へと再体制化されることが示された。一方、高次認知機能障害、特に自閉症者は、局所的な情報処理に固執してしまい、大域的な動きの知覚が困難であることが知られている。これは、局所的な細かい情報の処理に知覚・認知処理容量の大部分を費やしてしまうため、粗い情報を利用した情報処理が適切に行えないといった、高次認知機能障害特有の情報処理方略によって生じている可能性が考えられる。そこで、あらかじめ動きの情報を構成する空間情報と時間情報の両方において低周波数成分透過フィルタによって粗い情報を濾過・増幅した動画を自閉症者に提示した場合には、定型発達者と同様、大域的に一貫性のある動きの知覚が生じると予測される。もしこのような事実が明らかとなれば、これを足がかりに高次認知機能障害者、特に自閉症者に対して適切な情報処理方略の訓練が可能になる。また、運動軌道上で生じる変化に対する気づきの度合いを指標とすることで、行動レベルでの直接的な自閉症予見・スクリーニングが可能になることも期待される。

本論文では、仮現運動現象を通して、運動物体の脳内表現およびその機能性について心理物理的に詳

細な検討を行った。その結果、外界からの入力を我々の知覚的世界へと変換するミッドレベルの情報処理過程が明らかとなった。そこでは、外界からの情報が内的に圧縮されることで効率的な情報処理が実現されるとともに、物理的入力への抑制や再体制化によって一貫性のある安定した知覚世界が構築されることが示された。今後、運動物体の内的表現、アルゴリズム、およびそれらを実現する脳内基盤を詳細に分析することで、生体にとって適応性のある神経情報処理過程の諸相を明らかにすることができると考えられる。さらに、ヒトが脳内で行う情報処理方略に関する知見は、情報工学あるいは臨床的に応用可能であり、現実場面への貢献も期待される。

## 論文審査結果の要旨

本論文は、物体の仮現運動を知覚する場面において、物理的入力のない軌道上に形成される運動物体表象が、視覚処理により、情報が縮減された形式で表現され、単一の物体による一貫性のある運動知覚を成立させる機能を有することを、厳密な実験的検討によって明らかにしたものである。

研究1では、仮現運動軌道上に提示されたターゲット刺激の輝度検出閾値は上昇するが、仮現運動を導く誘導刺激とターゲット刺激との間で輝度極性や方位、形が一致しない場合には、この知覚的な抑制効果が弱まることが見出された。このことから、仮現運動軌道上に形成される運動物体表象は誘導刺激と同じ物体特徴を保持して内的に表現され、他の物理的入力を知覚的に抑制することで、一貫性のある安定した運動知覚を実現する機能を持つことが明らかとなった。

研究2では、運動物体表象が保持する奥行き情報について検討を行い、3次元的な凸の誘導刺激に対して、凸、凹および平らの図形を仮現運動軌道上に提示しても、運動方向知覚は変化しないことが明らかにされた。したがって、低次の時空間情報が優先される場面では、運動物体表象は2次元的な物体として表現されることが示された。一方、運動の滑らかさ知覚に関しては、凸の誘導刺激に対して、凸の図形ではなく、平らな図形が運動軌道上に提示されたときに、凹図形が提示された時よりも滑らかな動きが知覚された。また、誘導刺激が凹図形の場合、このような傾向は見られなかった。さらに、滑らかな動きが知覚されることで生じる誘導物体の消失位置に関する定位位置ずれに関しても、上記の結果が再現された。以上の結果から、高次の運動情報が処理される場面では、運動物体表象は、特に凸に関して2次元と3次元との間の中間的な奥行き情報を持つ物体として表現されることが明らかとなった。さらに、粗い空間成分を強調したぼけた凸図形によって定位位置ずれ量が増大することから、中間的な奥行きを持つ運動物体表象の形成は、低空間周波数成分優位の物体表現によって行われ、滑らかさを持った最適な運動知覚を成立させる機能を持つことが明らかとなった。

研究3では、仮現運動軌道上で時空間的な不連続（運動方向反転）が生じた場合、たとえ運動軌道の形が最後まで分からない場面においても、知覚的には時空間一貫性が維持されることが示された。このことから、運動物体表象形成過程には、局所的には一貫性のない物理入力が大域的にまとまった表現へと再体制化され、一貫性のある滑らかな運動知覚を生じさせるという機能があることが明らかとなった。

以上の知見は、運動物体の脳内表現とその機能を実現する神経基盤に関しても、重要な示唆を与えるものである。さらに人が脳内で行う情報処理方略に関する知見は、情報工学あるいは臨床的に応用可能であり、現実場面への貢献も期待される。したがって、脳内で運動知覚を実現するプロセスと機構について、本研究は新たな知見をもたらし、この分野の研究の発展に大きく貢献すると考えられる。よって、本論文の提出者は博士（文学）の学位を授与されるに十分な資格を有するものと認められる。